

PKS

PUBLIC
KNOWLEDGE
PROJECT

REVISTA DE GEOGRAFIA
(RECIFE)

<http://www.revista.ufpe.br/revistageografia>

OJS

OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS RASOS A PARTIR DO MODELO SHALSTAB NA BORDA ORIENTAL DA CHAPADA DO ARARIPE

Carlos de Oliveira Bispo¹, Fabrizio de Luiz Rosito Listo², Danielle Gomes da Silva³

¹ Doutorando, Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: bispocarlos93@gmail.com

² Professor Adjunto da Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: fabrizio.listo@ufpe.br

³ Professora Adjunta da Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: dannyavlis@yahoo.com.br

Artigo recebido em 09/12/2017 e aceito em 09/03/2018

RESUMO

O uso de modelos matemáticos na geomorfologia auxilia na previsão de processos de dinâmica superficial e na tomada de decisões. Um dos métodos utilizados para a previsão de escorregamentos translacionais são os modelos matemáticos em bases físicas, que descrevem fisicamente os processos por meio de equações matemáticas. Dessa forma, o objetivo deste artigo foi avaliar a suscetibilidade a escorregamentos translacionais na borda oriental da Chapada do Araripe, por meio do modelo matemático SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*). Foi gerado um cenário utilizando parâmetros topográficos e geotécnicos obtidos na literatura. Os resultados demonstraram que houve uma concordância com as áreas mais suscetíveis, apontadas pelo modelo, e as áreas mais declivosas da Chapada, onde em campo também foram verificadas cicatrizes atuais e pretéritas. A metodologia utilizada se mostrou eficaz na identificação dos padrões dos escorregamentos na área selecionada.

Palavras-chave: Escorregamentos translacionais; SHALSTAB; Chapada do Araripe.

SHALLOW LANDSLIDES PREDICTION FROM SHALSTAB MODEL ON THE EASTERN EDGE OF CHAPADA DO ARARIPE

ABSTRACT

The use of mathematical models in geomorphology assists in surface dynamics processes prediction and in decision making. One of the methods used for the prediction of translational landslides is the mathematical models on physical bases, which physically describe the processes through mathematical equations. Thus, the objective of this article was to evaluate the susceptibility to translational landslides on the eastern border of the Araripe Plateau, using the SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*) mathematical model. A scenario was generated using topographic and geotechnical parameters obtained in the literature. The results showed that there was agreement with the most susceptible areas, indicated by the model, and the more steep areas of the Chapada, where in the field were also verified current and previous scars. The methodology used was effective in identifying the patterns of landslides in the selected area.

Keywords: Translational slides; SHALSTAB; Chapada do Araripe.

INTRODUÇÃO

Apesar de se localizar no semiárido nordestino brasileiro, onde os índices pluviométricos são mais escassos em comparação com os ambientes úmidos, a Chapada do Araripe constitui-se num planalto sedimentar com média de 900 m de altitude, configurando-se como uma área de exceção climática (MORALES e ASSINE, 2015). Trata-se de um dos relevos de maior expressão altimétrica do semiárido brasileiro, cuja borda oriental possui

faces a barlavento, reconhecida como brejos de altitude, com precipitação acima dos 1000 mm e cobertura vegetal com portes também arbóreos. Assim, existe a formação de espessos mantos de intemperismo e solos profundos nas encostas, além de depósitos coluvionares, mais incoesos e com redução de estabilidade. Dessa forma, tal região resulta de uma dinâmica isolada, com destaque à sua influência hipsométrica e pluviométrica, neste caso, sobretudo pela ação das ZCIT - Zona de Convergência Intertropical, dando condições para a ocorrência de escorregamentos, inclusive em uma escala de tempo atual.

Embora existam muitos trabalhos de natureza ambiental realizados na região (ex. MENDONÇA *et al.*, 2009; RIBEIRO, 2012; LIMA, 2015; entre outros) não foram identificadas pesquisas anteriores que abordem diretamente a aplicação de modelos matemáticos em bases físicas para a previsão dos escorregamentos da Chapada do Araripe; tampouco no Nordeste brasileiro. Nesse contexto, compreender os processos morfodinâmicos atuais e pretéritos da paisagem é essencial para o melhor planejamento do uso da terra e na identificação de possíveis áreas de risco para a ocupação.

Para análise da dinâmica atual de escorregamentos, existem diversos modelos matemáticos para a previsão dos graus de suscetibilidade das encostas, destacando-se os modelos SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability*) (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994); SINMAP (*Stability Index Mapping*) (PACK *et al.*, 1998) e TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional*) (IVERSON, 2000 e BAUM *et al.*, 2002). Esses modelos possuem como base os modelos de estabilidade e hidrológicos, considerando informações geotécnicas e hidrológicas das encostas. Busca, com base em leis físicas, diminuir a subjetividade na análise de rupturas, quantificando os graus de suscetibilidade em valores absolutos, por meio do cálculo do Fator de Segurança (FS) (VIEIRA, 2007; LISTO, 2011).

Dentre os modelos citados, o adotado neste trabalho, foi o SHALSTAB, que tem sido utilizado com sucesso em diversas regiões da costa oeste dos Estados Unidos (MONTGOMERY, 1994; DIETRICH e MONTGOMERY, 1998). Estudos semelhantes têm sido realizados no Brasil, como por exemplo, Guimarães (2000); Gomes *et al.* (2005); Vieira (2007) e Listo (2011), que aplicaram o modelo na Serra do Mar Paulista e em áreas densamente urbanizadas do município de São Paulo (SP), e obtiveram resultados bastante satisfatórios.

O modelo SHALSTAB, criado a partir dos trabalhos de Dietrich *et al.* (1993), Montgomery e Dietrich (1994) e, posteriormente, implementado para utilização em ambiente

de Sistema de Informação Geográfica (SIG) (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998), é um modelo matemático determinístico que calcula a suscetibilidade a escorregamentos translacionais (LISTO, 2016). Resulta da combinação de dois modelos, um de estabilidade de encostas, baseado no método do talude infinito (teoria do Fator de Segurança, desenvolvida por Mohr-Coulomb) e outro hidrológico (*steady-state*) desenvolvido por O'Loughlin (1986). Na combinação destes dois modelos são incorporados, respectivamente, os parâmetros topográficos (declividade e área de contribuição), adquiridos a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT), e parâmetros geotécnicos (propriedades físicas do solo), tais como coesão, ângulo de atrito interno, peso específico e profundidade do solo (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar a suscetibilidade a escorregamentos translacionais na borda oriental da Chapada do Araripe, Nordeste do Brasil, por meio do modelo matemático SHALSTAB.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a suscetibilidade aos escorregamentos translacionais foi gerado um primeiro cenário no modelo SHALSTAB, utilizando parâmetros topográficos e geotécnicos disponíveis na literatura, que foram posteriormente validados a partir da correlação com uma carta de declividade e um inventário de cicatrizes, realizado a partir da interpretação de imagens de satélite e trabalhos de campo. Considerando o referencial teórico do modelo, foi utilizado como área piloto somente a borda oriental da Chapada do Araripe em sua porção barlavento voltada ao município do Crato (CE) com área territorial de 287 km².

Foi utilizada nesta pesquisa a ferramenta ASA (*Automatic SHALSTAB Analysis*), desenvolvida por Sbroglia *et al.* (2017), que permite utilizar o modelo diretamente no *software* ArcGIS (versão 10.4.1) a partir de uma rotina automatizada inserida na caixa de ferramentas (*ArcToolbox*) do referido *software*.

Os parâmetros topográficos foram obtidos por um Modelo Digital do Terreno (MDT) com resolução de 12,5 m e escala de 1:50.000, tendo como base de dados o satélite *ALOS PALSAR Global Radar Imagery*, disponibilizado gratuitamente. A partir deste MDT, foram gerados os mapas de declividade (adotando-se três classes conforme a Lei Lehmann, Lei Federal n.6.766/79, da qual afirma-se que a ocupação é permitida nas duas primeiras classes; na terceira, não é permitida a ocupação, salvo se atendidas exigências específicas das autoridades competentes) e o mapa de área de contribuição (considerando as oito direções principais para as quais ocorre o escoamento de água na encosta).

Os parâmetros geotécnicos do solo (coesão do solo (cs); coesão das raízes (cr); carga da vegetação (w); ângulo de atrito (f); peso específico do solo (rs) e profundidade do solo (z)) foram obtidos a partir de dados da literatura especializada por meio das pesquisas de Melo e Bandeira (2014); os quais realizaram estudos em áreas com características geomorfológicas, geotécnicas e hidrológicas na região do Cariri cearense; próxima a área selecionada nesta pesquisa. Assim, os valores utilizados foram: $cs = 0$ (kPa); $cr = 0$ (kPa); $w = 0$ (N/m²); $rs = 1600$ (kgm³); $f = 35(^{\circ})$ e $z = 3$ (m).

Como resultado foi gerado um primeiro cenário de suscetibilidade com sete classes de estabilidade, típicas do modelo, desde incondicionalmente instável a incondicionalmente estável, em função da quantidade de chuva necessária (chuva crítica) sobre a transmissividade do solo para a ocorrência de escorregamentos. Este primeiro cenário foi validado a partir da correlação com as classes da carta de declividade (considerando as diretrizes da Lei Lehmann supracitada, quanto à ocorrência de processos), bem como a partir das cicatrizes de escorregamentos identificadas em trabalhos de campo e por meio da fotointepretação de imagens de satélite (isto é, se ocorreram cicatrizes nas áreas indicadas como mais instáveis pelo SHALSTAB) a partir do índice Concentração de Cicatrizes (CC).

Destaca-se que as cicatrizes foram identificadas por meio da diferença de cores e de textura, além do seu aspecto alongado nas imagens. Além disso, no limite das cicatrizes, foram consideradas somente a porção de ruptura, desconsiderando suas áreas de arraste e de depósito coluvionar.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme já mencionado, dentro do Contexto da Chapada do Araripe, foi selecionada uma escarpa menor em sua borda oriental, no município do Crato (Cariri Cearense), conforme a Figura 1. Tal recorte se configura como um brejo de altitude, ou seja, um refúgio ecológico encontrado em serras, planaltos e chapadas, no qual, o relevo é influenciado pelo efeito orográfico, proporcionando uma maior umidade atmosférica (MARQUES *et al.*, 2014).

Geomorfologicamente, a área piloto apresenta uma escarpa declivosa em sua borda e um topo tabular, essencialmente plano, típico de Chapadas (Figura 2). Dessa forma, foram observadas diversas cicatrizes de escorregamentos translacionais, pretéritas e atuais, nas áreas escarpadas mais íngremes (Figura 2).

Conforme a carta de declividade (Figura 3), um dos parâmetros do SHALSTAB, foi possível verificar que a primeira classe (entre 0° e 9,6°) apresentou 74,4% da área total

(Frequência de Distribuição-FD), influenciadas pelas muitas áreas planas no topo da Chapada. Em seguida, a classe 9,61° e 16,7° possui uma frequência de 17,3% e a última (16,8° >), 8,3% do total da área, sendo esta a classe mais suscetível quanto à ocorrência dos processos (Figura 4).

Quanto ao mapa de suscetibilidade (Figura 5), os setores que apresentaram maior instabilidade estão concentrados principalmente na área de escarpa da chapada (áreas de maior declividade). Assim, as classes de estabilidade do modelo (incondicionalmente estável; >-2,2 e -2,5 e -2,2) juntas possuem uma FD de aproximadamente 99% da área, enquanto as classes mais instáveis (incondicionalmente instável; <-3,1 e -3,1 e -2,8) cerca de, somente, 1% (Figura 6). Entretanto, conforme Salciarini *et al.* (2006), um mapa de suscetibilidade ideal deve maximizar a concordância entre a localização prevista dos escorregamentos e aquela mapeada e minimizar a área prevista como sendo instável. Em outras palavras, os mapas que supervalorizam a quantidade de áreas instáveis possuem uma menor acurácia quanto ao planejamento ambiental e urbano de uma determinada área.

Com base no inventário dos escorregamentos (Figura 7), foram mapeadas 34 cicatrizes e por meio da superposição das cicatrizes ao mapa de suscetibilidade (Concentração de Cicatrizes-CC), identificou-se que 32 delas (97%) estão situadas nas áreas instáveis (Figura 8). Desta forma, percebeu-se que houve uma elevada concordância entre as áreas previstas como instáveis e as classes mais declivosas com a presença de cicatrizes de escorregamentos observadas em campo, confirmando a eficiência desta primeira aplicação do modelo. Nesse sentido, embora a classe de maior declividade (16,8°>) tenha apresentado 8,3% e as classes mais instáveis do SHALSTAB somente cerca de 1% de frequência, a maioria das cicatrizes visitadas em campo coincidiram com estas classes; evidenciando que o modelo previu corretamente as áreas de maior instabilidade.

Embora a declividade não seja o único fator condicionante dos escorregamentos, deve-se destacar que as áreas mais íngremes favorecem a ocorrência dos processos, principalmente devido sua influência na velocidade de deslocamento de materiais e na capacidade de transporte, aumentando a suscetibilidade da área (IPT, 1991; SELBY, 1993; LISTO, 2011; GUERRA *et al.*, 2017). Corroborando esta avaliação, Listo e Vieira (2012), ao aplicarem o modelo SHALSTAB em uma bacia hidrográfica densamente urbanizada no município de São Paulo, também verificaram que os valores mais altos de declividade foram aqueles que mais coincidiram com as áreas instáveis e, portanto, mais suscetíveis aos escorregamentos.

Figura 1 – Localização da área de estudo no contexto da Chapada do Araripe e do Estado do Ceará.

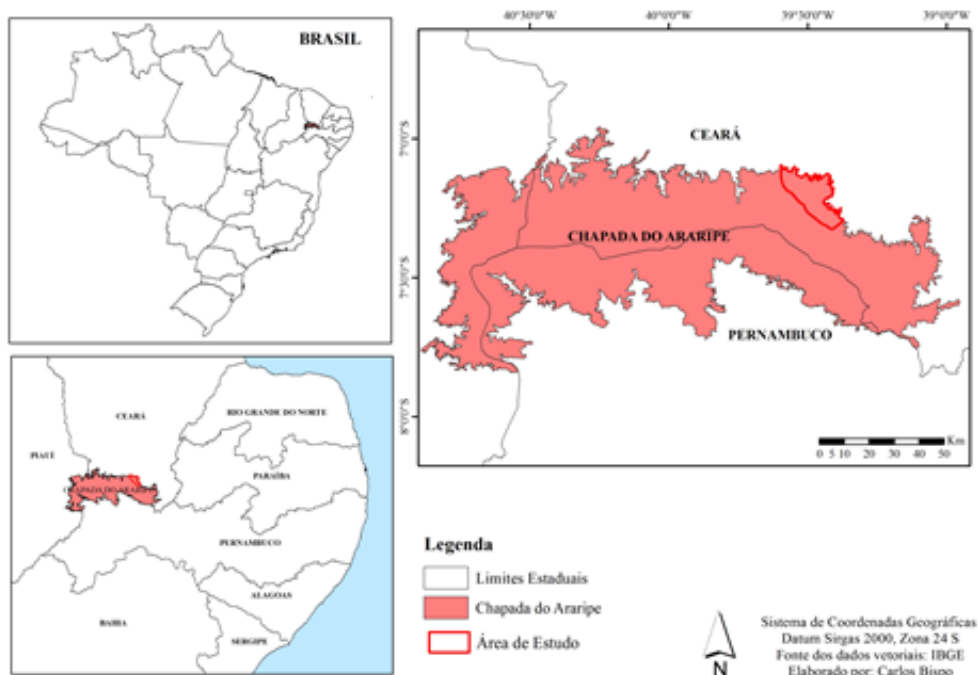


Figura 2 - (A) Modelo tridimensional da área de estudo (exagero vertical de 4x) na qual se observa que a escarpa foi bastante atingida pelos escorregamentos e topo tabular com incidência ausente de processos, devido sua forma plana e (B) Cicatrizes de escorregamentos, atuais e pretéritas, na referida escarpa.

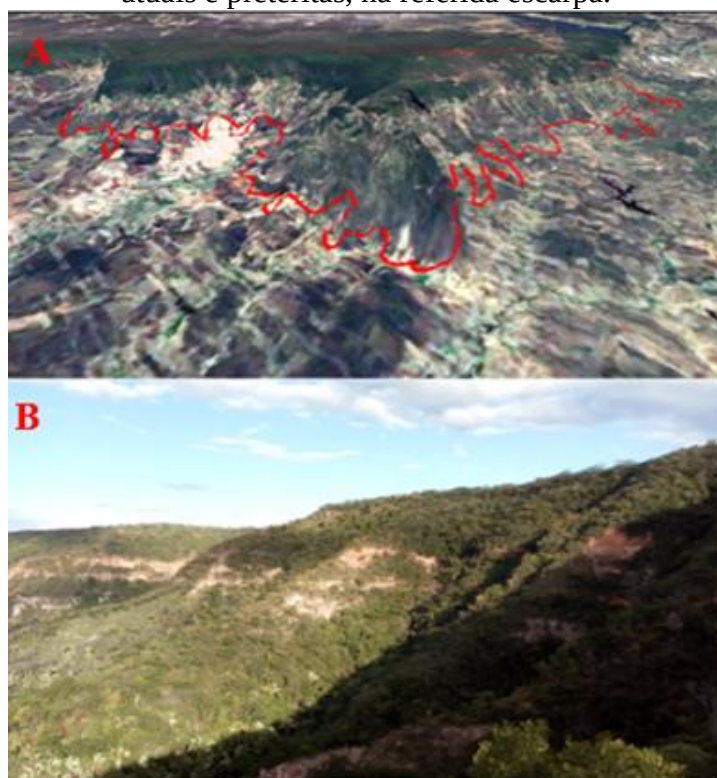


Figura 3 - Mapa de declividade da área de estudo.

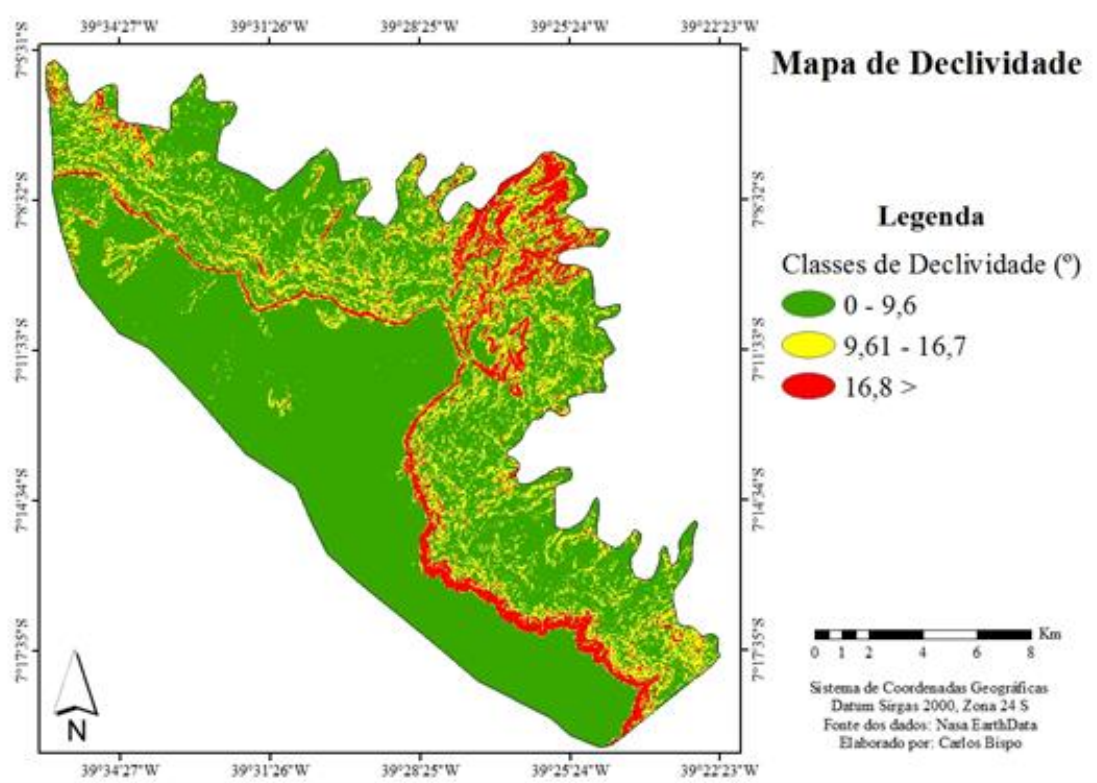


Figura 4 – Frequência de Distribuição (FD) das classes de declividade.

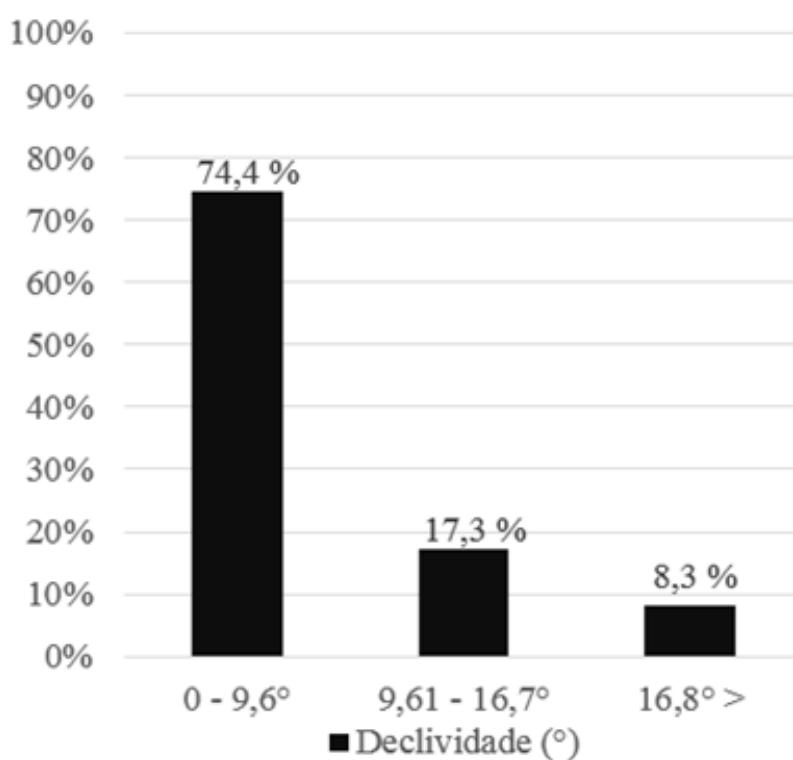


Figura 5 - Mapa de Suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB na área de estudo (Parâmetros utilizados: $cs = 0$; $cr = 0$; $w = 0$; $rs = 1600 \text{ kgm}^3$; $f = 35^\circ$ e $z = 3$).

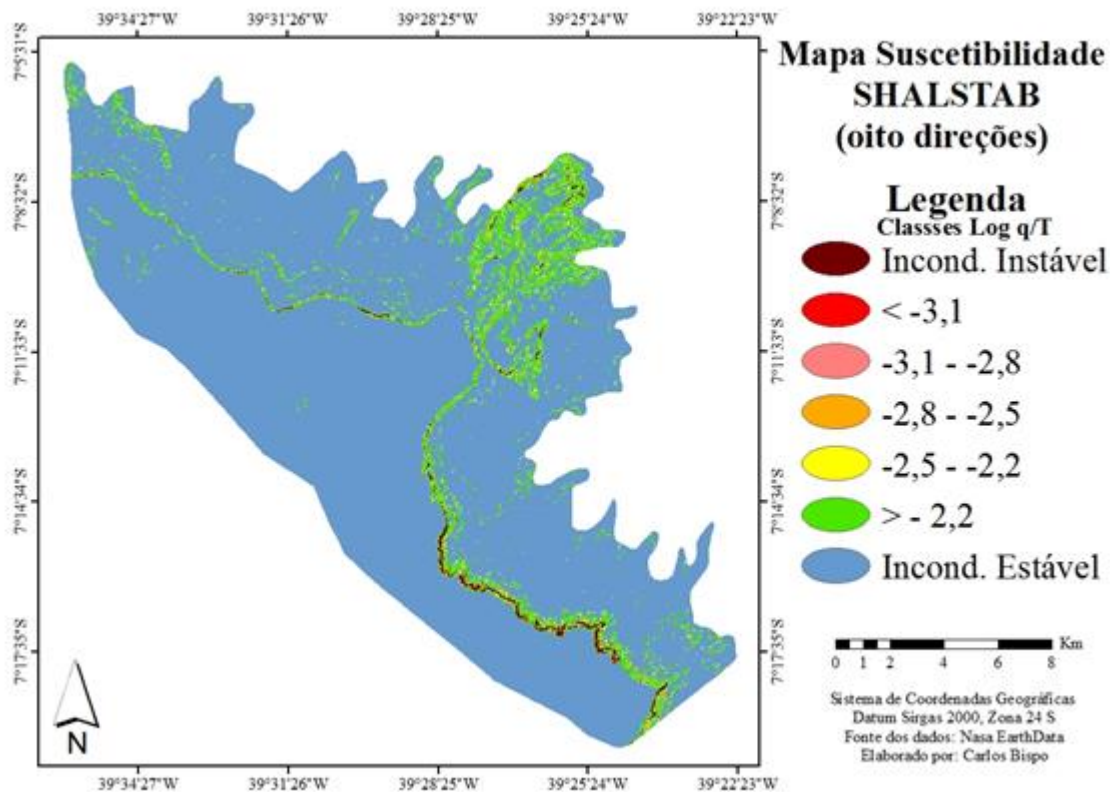


Figura 6 – Frequência de Distribuição (FD) das classes de suscetibilidade.

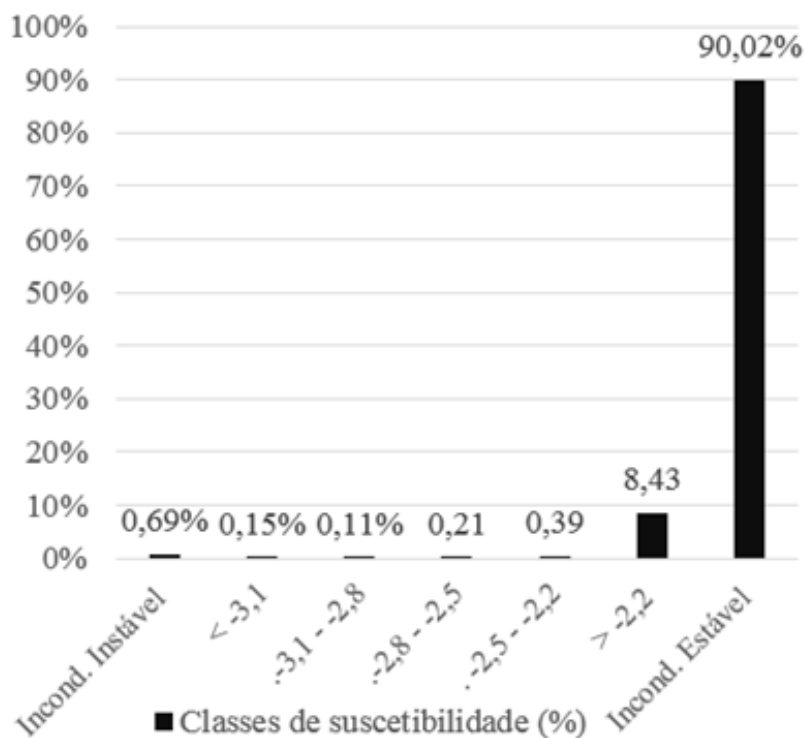


Figura 7 - Sobreposição das cicatrizes de escorregamentos ao mapa de suscetibilidade.

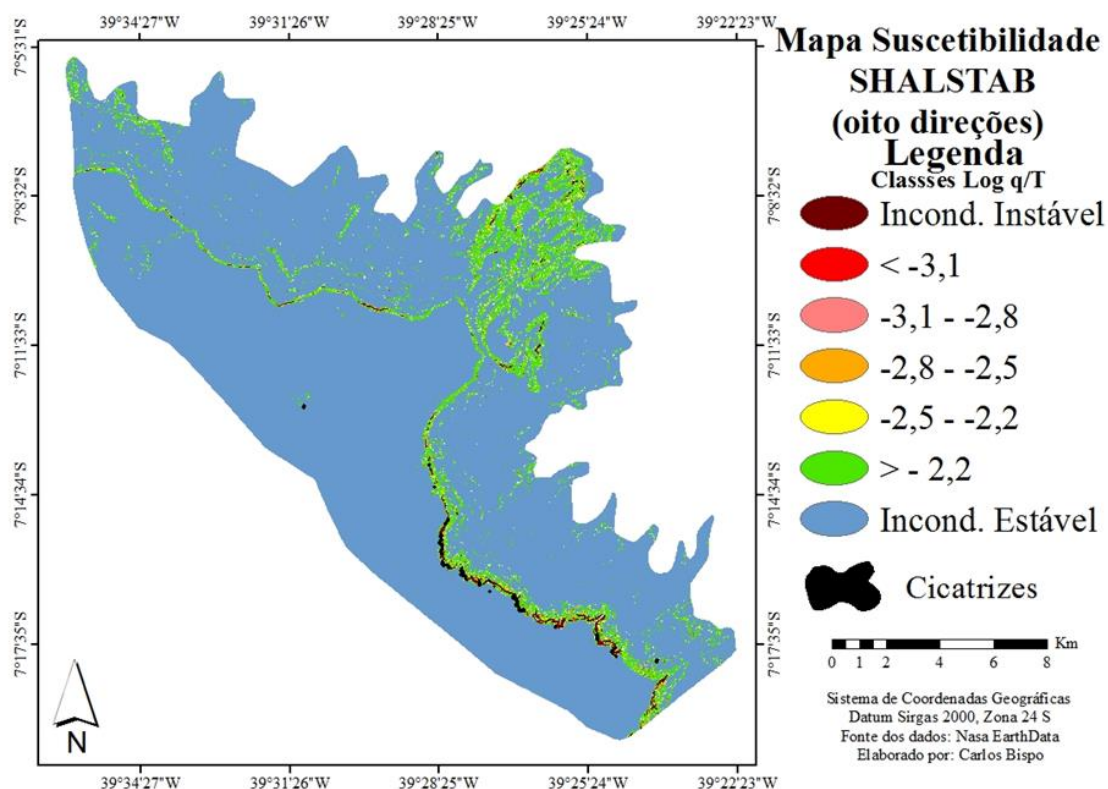
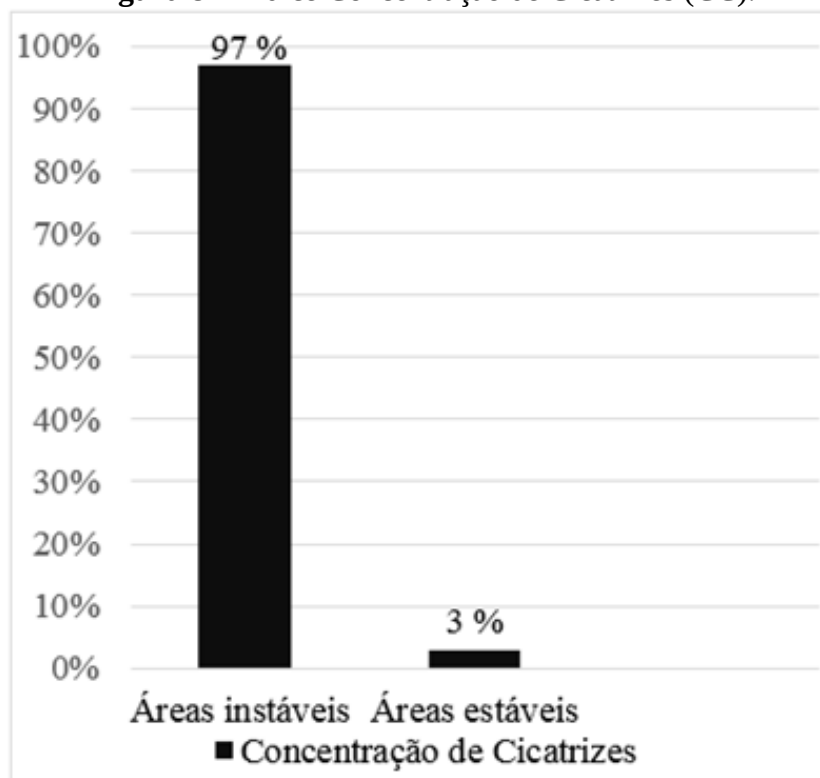


Figura 8 – Índice Concentração de Cicatrizes (CC).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados alcançados indicaram que houve um grau de acerto na previsão realizado pelo modelo SHALSTAB, na qual, foi possível verificar a influência das unidades geomorfológicas, bem como, seus parâmetros morfométricos de declividade, como grandes fatores desestabilizadores causadores dos escorregamentos na área. Nesse contexto, deve-se destacar que a herança geomorfológica de uma paisagem, associada às características morfológicas do relevo e pluviométricas, possui uma elevada influência na suscetibilidade em uma escala de tempo atual.

Salienta-se também o fato da aplicação pioneira de modelos matemáticos no nordeste brasileiro, sobretudo para o semiárido nordestino, no qual existe uma lacuna no estudo de processos de dinâmica superficial. O uso da ferramenta *ASA (Automatic SHALSTAB Analysis)* também foi de grande relevância, uma vez que simplificou a rotina automatizada complexa do modelo; tornando-a mais objetiva e de fácil acesso para a obtenção final do mapa de suscetibilidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (UFPE), assim como aos Laboratórios ENPLAGEO/UFPE e GEQUA/UFPE, pelo espaço físico e possibilidade de grupos de interação e discussão acadêmica.

REFERÊNCIAS

- BAUM, R. L. et al. **TRIGRS: A FORTRAN Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis**. USGS, Colorado, 2002. pp. 35.
- GOMES, R. A. T., R. F. GUIMARÃES, O. A. CARVALHO JR and N. F. A. FERNANDES. Análise de um Modelo de Previsão de Deslizamentos (SHALSTAB) em Diferentes Escalas Cartográficas. Solos e Rochas. **Revista Brasileira de Geotecnia**. v. 28, p. 85-97, 2005.
- GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M.A.; JORGE, M. C. O.; BEZERRA, J. F. R.; SHOKR, M. S. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. **Pedosphere**, v. 27, p. 27-41, 2017.
- GUIMARÃES, R. F. **Utilização de um Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos Rasos com Controle Topográfico: Adequação e Calibração em Duas Bacias de Drenagem**. 2000. 150 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

IVERSON, R. M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, 2000. 36: 1897-1910.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Manual de ocupação de encostas**. São Paulo. (Publicação, 1 831). 1991.216 p.

LIMA, F. J. **Evolução geomorfológica e reconstrução paleoambiental do setor subúmido do Planalto Sedimentar do Araripe**: um estudo a partir dos depósitos coluviais localizados nos municípios de Crato e Barbalha – Ceará. 2015. 192 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

LISTO, F. L. R. **Análise da suscetibilidade e do grau de risco a escorregamentos rasos na bacia do Alto Aricanduva, RMSP (SP)**. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

LISTO, F.L.R.; VIEIRA, B.C. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, v. 169-170, p. 30-44, 2012.

LISTO, F. L. R. Modelos matemáticos aplicados à previsão de escorregamentos translacionais rasos: exemplos em áreas naturais e de risco. **CLIO. Série Arqueológica (UFPE)**, v. 31, p. 91, 2016.

MARQUES, A.L.; SILVA, J.B; SILVA, D.G. Refúgios úmidos do semiárido: um estudo sobre o brejo de altitude de Areia-PB. **Revista Geotemas**. V.4, n.2. P.17-31, 2014.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F.; FRANCA, R.M.; VÁSQUEZ, E. M. F. FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, p. 89-98, 2009.

MELO, C. E.; BANDEIRA, A. P. N. Estudo do colapso dos solos para dimensionamento de fundações superficiais. In: XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2014, Goiânia. **Anais... XVII CBMS**, Goiânia, 2014.

MICHEL, G.P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. (1994). **A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding**. *Water Resources Research* (30). p. 1153-1171.

MORALES, N. and ASSINE, M.L. Chapada Do Araripe: A Highland Oasis Incrusted into the

Semi-arid Region of Northeastern Brazil. In: Vieira, B.C.; Salgado A.; Santos L. (eds). *Landscapes and Landforms of Brazil. World Geomorphological Landscapes*. Springer, Dordrecht, 2015.

O'LOUGHLIN, E. M. (1986) **Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis**. *Water Resources Research*, 22, pp. 794-804.

PACK, R. T. et al. **SINMAP – a stability index approach to terrain stability hazard mapping**. User's manual. Terratech Consulting Ltd. Salmon Arm, B. C. Canadá, 1998, 68 p.

RIBEIRO, S. C. **Etnogeomorfologia sertaneja: proposta metodológica para a classificação das paisagens da sub-bacia do rio Salgado/ CE**. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia/ UFRJ, 2012, p. 281.

SALCIARINI, D.; GODT, J. W.; SAVAGE, W. Z.; CONVERSINI, P.; BAUM, R. L; MICHAEL, J. A. (2006). Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Regional of Central Italy. **Landslides** 3: 181-194.

SELBY, M. J. **Hillslope: materials & processes**, New York, 1993.

SBROGLIA, R. M.; PORATH, P. H. M.; HIGASHI, R. A. R.; OLIVEIRA, F. H. Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis. In.: XII Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2017. **Anais...** COBRAE 2017, Florianópolis/SC, Brasil.

VIEIRA, B. C. (2007). **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.193p.